



新型开式卡诺电池储电储热(蒸汽)联供系统的热力学分析

任帅帅^{1,2}, 黄尚文^{1,2}, 罗开琦³, 黄云³, 罗二仓^{1,2}

(¹中国科学院理化技术研究所, 北京 100190; ²中国科学院大学, 北京 100049; ³中国科学院过程工程研究所, 北京 100190)

摘要: 卡诺电池因其独特的热-电转换工作特性可将储能系统拓展为热电联供系统, 具有结构简单、经济性高、环境友好等优势。为进一步提高卡诺电池的工作效率和储电密度, 本工作提出了一种新型的基于开式朗肯热力学过程的储电储热-蒸汽联供系统, 并建立了系统与各部件的热力学仿真模型。研究表明, 在高温端设计温度 250℃、低温端设计温度 120℃、压缩机等熵效率 0.85、膨胀机等熵效率 0.9 的情况下, 系统采用水作为工质, 硝酸锂、赤藓糖醇分别作为高低温储热材料时, 其电-电往返效率达到 71.64%, 电-热(蒸汽)联供综合效率可达 87.69%, 储电密度可达 12.10 kWh/m³, 并与相同工况及假设下的典型闭式卡诺电池进行了对比, 结果表明电-电往返效率明显提升。进一步对系统进行了参数敏感性分析, 分析了压缩机入口气相分率与出口压力对系统电-电往返效率及电-热(蒸汽)联供综合效率等系统热力学性能的影响, 研究了压缩机与膨胀机等熵效率以及储水罐降温温差大小对系统关键指标的影响。本研究结果为开式卡诺电池的设计优化与应用提供了理论支持。

关键词: 开式朗肯; 卡诺电池; 储能; 热电联供; 往返效率

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1041

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 02-488-12

Thermodynamic analysis of a novel open-cycle carnot battery system for combined electricity and heat (steam) storage

REN Shuaishuai^{1,2}, HUANG Shangwen^{1,2}, LUO Kaiqi³, HUANG Yun³, LUO Ercang^{1,2}

(¹Technical Institute of Physical and Chemistry, CAS, Beijing 100190, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³Institute of Process Engineering, CAS, Beijing 100190, China)

Abstract: The unique thermoelectric conversion capability of Carnot battery allows its expansion into a combined heat and power system with several advantages, including simple structure, cost-efficiency, and environmental friendliness. To further improve the efficiency and electrical energy storage density of Carnot batteries, a novel Rankine open-cycle energy storage system is proposed for combined electricity and steam generation, based on thermodynamic models for the system and its components. The results demonstrate that under design conditions with high/low-temperature ends at 250℃/120℃, compressor/expander isentropic efficiencies of 0.85/0.9, using water as the working fluid and lithium nitrate/erythritol as thermal storage materials, the system achieves an electrical round-trip efficiency

收稿日期: 2025-11-17; 修改稿日期: 2025-12-18。

基金项目: 中国科学院前沿战略科技A类先导专项课题(XDA0400102); 国家重点研发计划(2022YFF0712600)。

第一作者: 任帅帅(2002—), 男, 硕士研究生, 研究热泵技术, E-mail: renshuaishuai24@mails.ucas.ac.cn; 通信作者: 罗开琦, 助理研究员, 研究热声制冷/热泵技术、热泵储电技术等, E-mail: luokaiqi@ipe.ac.cn; 罗二仓, 研究员, 研究热声发动机/制冷机技术、混合工质节流制冷技术、固体制冷技术等, E-mail: ecluo@mail.ipc.ac.cn。

引用本文: 任帅帅, 黄尚文, 罗开琦, 等. 新型开式卡诺电池储电储热(蒸汽)联供系统的热力学分析[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(2): 488-499.

Citation: REN Shuaishuai, HUANG Shangwen, LUO Kaiqi, et al. Thermodynamic analysis of a novel open-cycle carnot battery system for combined electricity and heat (steam) storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(2): 488-499.

of 71.64%, a combined electrical-thermal efficiency of 87.69%, and an electrical energy storage density of 12.1 kWh/m³. Compared with a typical closed-cycle Carnot battery under the same working conditions and assumptions, the proposed system shows a substantial improvement in the electrical round-trip efficiency. Furthermore, a parameter sensitivity analysis is performed to (1) study the effects of the compressor inlet gas-phase fraction and outlet pressure on the electrical round-trip efficiency and combined electrical-thermal (steam) efficiency, and (2) analyze the effects of the compressor and expander isentropic efficiencies and the tank cooling on the key performance indicators of the system. This study provides a theoretical foundation for the design optimization and practical application of open-cycle Carnot batteries.

Keywords: Rankine open-cycle; Carnot battery; energy storage; combined heat and power; round-trip efficiency

我国工业终端以电和蒸汽为主要能量载体,但随着新能源发电兴起,用电高峰期与低谷期之间的电力差持续增加^[1],为提高经济性及实现碳达峰碳中和,必须解决工业园区内的储能和蒸汽供应问题^[2]。目前,储能技术主要分为抽水储能、飞轮储能、电化学储能、压缩气体储能^[3]、卡诺电池/热泵储能^[4]等^[5]。然而,现有的储能系统难以满足大规模电-蒸汽联供需求,且多受条件限制。如抽水储能虽然系统功率较大,但电站选址受地势制约且建设周期长,难以应用于工业园区;电化学储能目前仍面临着储能安全性、技术问题等一系列挑战。结合工业园区储能系统规模、使用寿命及安全性而言,压缩气体储能技术和卡诺电池技术更有优势。

压缩气体储能是通过压缩气体实现能量从电能转为压力势能和热能的技术,并通过储存压力势能和压缩热/膨胀冷实现能量储存^[6],其典型系统主要由压缩机、蓄热系统、透平、工质储罐等组成。在储能过程中,系统通过压缩机压缩气体,将电能转化为压力势能和热能,并通过工质储罐和蓄热系统储存起来,实现工质单次压缩;在释能过程中,工质吸收热量,系统通过工质进入透平做功,将压力势能和热能转化为电能,并通过工质储罐储存工质。部分类型的压缩气体储能系统还包括回热器、蓄冷系统等。按照工质类型,主要可分为压缩空气储能和压缩二氧化碳(CO₂)储能^[7]。与空气相比,CO₂具有临界参数低、容易液化、能量密度高、换热性能好等特性^[8]。许多研究学者针对不同的压缩CO₂储能系统展开了研究。Li等^[9]构建了地下储存工质的CO₂储能系统数值模型,并模拟了完整充放

电循环期间的压力变化和系统效率;Su等^[10]对不同滑动压力范围的CO₂储能系统进行性能分析,发现滑动范围越大,储能系统往返效率越低。目前,压缩气体储能作为开式储能技术,即工质在储能和释能过程中往返工作,需要储存大量气态工质,导致储能密度低、存在滑压运行等影响系统性能的问题,而且受到地理条件限制(需要天然盐穴或矿洞),而采用人工储罐的方案高压容器的单位体积成本高,价格昂贵^[11-12]。为解决储能密度问题,学者提出液态CO₂储能^[13]、液态空气储能^[14]等技术。Wan等^[15]探讨了不同运行策略下液态CO₂储能技术在设计工况及非设计工况下的性能,结果表明在高负荷范围时,滑压运行会导致往返效率降低。Zheng等^[16]分析了基于不同储存模式下CO₂储能系统的热力学与经济性能,结果表明高压端液态储存和低压端气态储存时,往返效率最高为66.54%、而储能密度仅为0.58 kWh/m³,高低压端均为液态储存时,往返效率为43.87%、储能密度为18.80 kWh/m³。Zhao等^[17]提出了一种利用天然气提供冷源的液态CO₂储能系统,能量密度为7.74 kWh/m³。需注意目前多数与液态CO₂储能相关的文章在计算储能密度时,未考虑储热材料体积,而在液态CO₂储能系统中储热材料作为储能物质,其体积可能接近甚至超过工质罐体积,不可忽略。尽管对压缩气体储能系统的研究已经取得了一定的进展,但目前即使是液态储存,压缩系统仍然需要储存高压工质,难以避免滑压运行且高压储罐经济性差。

卡诺电池技术(又称为热泵储能技术),是一种通过功-热转换和热-功转换的热力学过程,利用热

能储存电能的大规模物理储能技术^[18-19],其典型系统由热泵循环、热机循环和蓄热系统构成。在储能过程中,系统通过热泵循环将电能转化成具有温度差的高低温热能储存起来,工质在热泵循环中循环压缩;在释能过程中,系统通过热机循环将储存的高低温热能转化为电能,实现了电能-热能-电能的储能释能过程^[20]。按照循环类型,卡诺电池系统主要包括基于布雷顿循环、朗肯循环以及斯特林循环系统。其中,布雷顿循环系统中工质温度、压力较高,其储热温度一般高于300℃。Huang等^[21]提到冷源温度在0℃、热源温度在450℃的布雷顿循环系统,在不集成外部热源或冷源时,往返效率为57.6%。王文瑞等^[22]对布雷顿循环系统进行焓分析,发现对于布雷顿系统,热机循环中泵压缩焓损失占比为18.8%,热泵循环中节流焓损失占比为15.9%。朗肯循环系统的主要特点是工质在工作循环中存在相变,可在更低的温区内运行,储热温度一般不超过200℃,较低的储热温度会导致低往返效率^[23]。Sun等^[24]提到传统朗肯卡诺电池效率仅为39.44%。Fergani等^[25]对不同充放电时间下的朗肯循环系统进行分析,同时长运行下往返效率最高为42.2%,且该条件下节流焓损失超过15%。为提高朗肯循环系统电-电往返效率,研究人员采取了利用低品位热能的方法,但该方法存在较低的能源总往返效率和较低的储电密度^[26]。Lu等^[27]和He等^[28]在计算系统往返效率时考虑了系统所使用的低品位热能,导致能源总往返效率不足35%。概括来讲,上述卡诺电池系统均为闭式卡诺电池系统,其系统由热机循环和热泵循环组成,热力转换过程多、部件多且流程复杂,节流等不可逆损失大,电-电往返效率较低;因此急需开发一种高效率、高储能密度的新型储能系统。

综上所述,压缩气体储能系统面临滑压运行、高压储罐经济性差、储能密度低等问题;传统卡诺电池则因工质循环工作、热力转换过程多、节流等不可逆损失大而使效率受限。为解决上述问题,本工作作者课题组结合两种储能系统优势,提出两相压缩的开式卡诺电池系统,相关技术已申请中国发明专利^[29]。基于上述研究,本工作作者课题组继续提出开式卡诺电池储电储热联供系统。

1 系统及热力过程描述

开式卡诺电池储电储热联供系统构型如图1所

示。该系统由低温储水罐(L-WT)、低温储热换热器(L-TES)、两相螺杆机(COM/EXP,储能过程为两相压缩机,释能过程为两相膨胀机)、高温储热换热器(H-TES)和高温储水罐(H-WT)构成。该系统以储热材料潜热形式及工质显热形式储电储热。工质在系统中往返工作,其往返温熵图见图2,其中1→2→3→4为储能过程,5→6→7→8为释能过程。在释能过程中可从流体7取热,4→5与8→1为储能释能两过程的连接过程,具体工作流程如下。

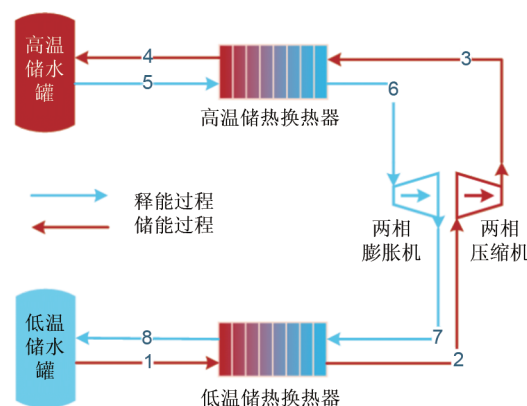


图1 开式卡诺电池系统

Fig. 1 Open-cycle Carnot battery system

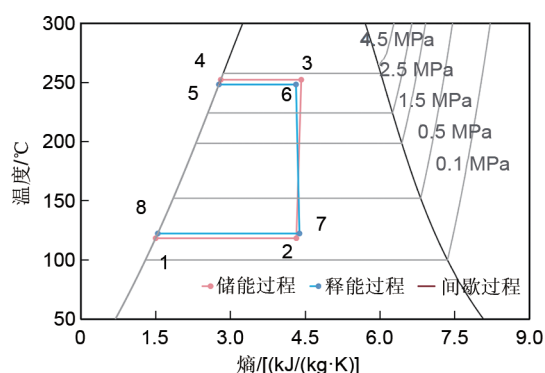


图2 工质往返温熵图

Fig. 2 Temperature-entropy diagram of the working fluid

储能过程：低温饱和和液态水从低温储水罐排出，低温储水罐中的水处于低温饱和和液体状态，排水过程压力和温度保持恒定；饱和水进入低温储热换热器吸收热量，进入气液两相状态，储热换热器内储热材料发生液固相变，温度保持恒定；两相水蒸气进入两相压缩机，压缩机消耗电能压缩两相水蒸气得到高温两相水蒸气；高温两相水蒸气进入高温储热换热器完全液化释放热量得到高温饱和和液态水，储热换热器内储热材料发生固液相变，温度保

持恒定; 饱和液态水进入装有高温饱和和液态水的高温储水罐, 储水罐压力和温度保持恒定。实现电能到热能的转换, 完成储能过程。

释能过程: 高温饱和和液态水从高温储水罐排出, 高温储水罐中的水处于高温饱和和液体状态, 排水过程压力和温度保持恒定; 饱和水进入高温储热换热器吸收热量, 进入气液两相状态, 储热换热器内储热材料发生液固相变, 温度保持恒定; 两相水蒸气进入两相膨胀机, 膨胀机输出机械功并带动旋转电机发电, 同时得到低温两相水蒸气; 低温两相水蒸气中部分热量可用于供热, 供热后进入低温储热换热器完全液化释放热量得到低温饱和和液态水, 储热换热器内储热材料发生固液相变, 温度保持恒定; 饱和液态水进入装有低温饱和和液态水的低温储水罐, 储水罐压力和温度保持恒定。实现热能到电能的转换, 完成释能过程。

连接过程: 4→5、8→1使用水, 冷却储水罐。在降低储水罐温度、增大后续换热温差(降温增差)的同时也可以得到可利用的水蒸气。

相比压缩气体储能系统, 本系统工作在工质两相区, 工质以液态形式储存, 储水罐压力低、压力变化小、系统可避免滑压运行, 有望实现高的电-电往返效率; 系统采用固液相变储热, 工质以液态形式储存, 所以工质储罐体积较小、系统储电储热密度一般更高。相比传统闭式热力循环卡诺电池系统, 本系统采用储存工质的形式避免工质在热泵循环和热机循环的较多压缩/膨胀热力过程中产生不可逆损失, 显著地提升了储电系统的电-电往返效率等关键技术指标。

2 仿真模型

针对开式卡诺电池储电储热联供系统, 本工作采用 Aspen Plus 软件建立系统及各部件的热力学模型, 循环流程示意如图3所示。特别地, 考虑软件功能, 释能过程与储能过程同时长运行, 压力机械(压缩机/膨胀机)用两个压力变送模块 Compr 分别实现两相压缩机(COMP)、两相膨胀机功能(EXP), 均采用等熵效率模型, 不考虑机械损失; 储热换热器部件功能使用换热模块 Heater 实现, S1与S2分别为流入高温储热换热器与流出高温储热换热器的热流, 储热损失采用操纵器模块 Mult实现, 其中Q表示对热流进行操作, EF为系数因子, 储水罐部件功能使用分流模块 Tank实现, 同时在分流模块前加入换热模块(H-WT1、L-WT1)实现降温增差过程。

为简化计算, 基于热力学第一定律和热力学第二定律, 对系统模型作以下假设。

- (1) 系统各组成部分均在稳态条件下运行。
- (2) 除高温储热换热器以外, 其余部件热损失均忽略不计。
- (3) 工质在进出储热换热器、储水罐和管道中的压力损失忽略不计。
- (4) 膨胀机和压缩机的等熵效率为定值, 不考虑摩擦等任何形式引起的机械损失。
- (5) 充能过程和释能过程运行时间相同, 均为4 h。
- (6) 在单次往返中高温储热换热器的热量无剩余。

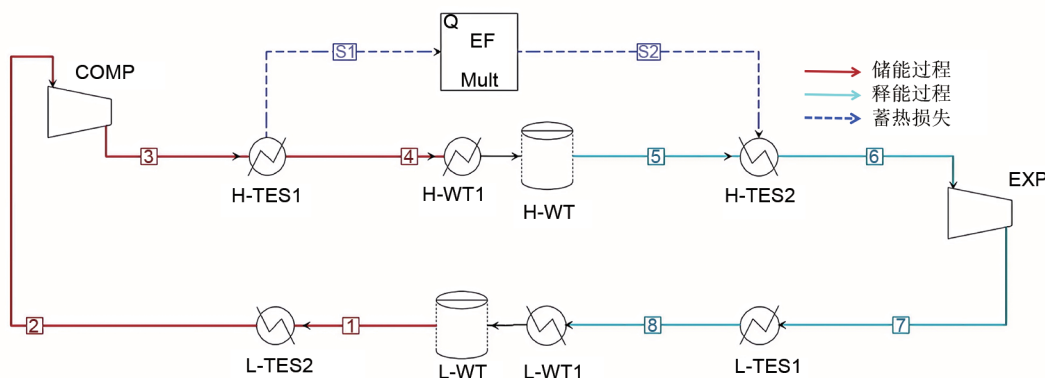


图3 开式卡诺电池储电储热联供系统 Aspen Plus 往返流程

Fig. 3 Aspen Plus round-trip flowchart of the open-cycle Carnot battery system

2.1 热力学模型

为了更好地进行开式卡诺电池储电储热联供系统热力学分析, 分别对各个部件和系统进行热力学建模。

压缩机模型见式(1)~式(3)。

$$\eta_c = \frac{h_{out, is} - h_{in}}{h_{out} - h_{in}} \quad (1)$$

$$W_{c, is} = m_{water}(h_{out, is} - h_{in})\Delta t_{es} \quad (2)$$

$$W_c = m_{water}(h_{out} - h_{in})\Delta t_{es} \quad (3)$$

式中, h 为单位质量流量工质焓, kJ/kg ; η_c 为压缩机的等熵效率; 下标 c 代表压缩机; is 代表等熵; in 、 out 分别表示进出口; es 代表储能过程; Δt 为工作时间, h ; W 为电量, kWh ; m 为工质质量流量, kg/h 。

膨胀机模型见式(4)~式(6)。

$$\eta_e = \frac{h_{in} - h_{out}}{h_{in} - h_{out, is}} \quad (4)$$

$$W_{e, is} = m_{water}(h_{in} - h_{out, is})\Delta t_{er} \quad (5)$$

$$W_e = m_{water}(h_{in} - h_{out})\Delta t_{er} \quad (6)$$

式中, η_e 为膨胀机的等熵效率; 下标 e 代表膨胀机; er 代表释能过程。

高温储热换热器模型见式(7)~式(10)。

$$Q_{htes, es} = m_{water}(h_{in} - h_{out})\Delta t_{es} \quad (7)$$

$$Q_{htes, er} = m_{water}(h_{out} - h_{in})\Delta t_{er} \quad (8)$$

$$\eta_{htes} = \frac{Q_{htse, er}}{Q_{htes, es}} \quad (9)$$

$$V_{htes} = \frac{Q_{htes, es}}{\rho_{e, htse}} \quad (10)$$

式中, $Q_{htes, es}$ 为储能过程高温储热换热器储存的热量, kWh ; $Q_{htes, er}$ 为释能过程高温储热换热器释放的热量, kWh ; η_{htes} 为高温储热换热器的储热效率; V_{htes} 为高温储热工质体积, m^3 ; $\rho_{e, htse}$ 为高温储热工质固液相变时的储热密度, kWh/m^3 ; 下标 $htes$ 表示高温储热换热器。

低温储热换热器模型见式(11)~式(13)。

$$Q_{ltes, es} = m_{water}(h_{in} - h_{out})\Delta t_{es} \quad (11)$$

$$Q_{ltes, er} = m_{water}(h_{out} - h_{in})\Delta t_{er} \quad (12)$$

$$V_{ltes} = \frac{Q_{ltes, es}}{\rho_{e, ltse}} \quad (13)$$

式中, $Q_{ltes, es}$ 为储能过程低温储热换热器释放的热量, kWh ; $Q_{ltes, er}$ 为释能过程低温储热换热器吸收的热量, kWh , 包括供热热量和储存热量, kWh ; V_{ltes} 为低温储热工质体积, m^3 ; $\rho_{e, ltse}$ 为低温

储热工质固液相变时的储热密度, kWh/m^3 ; 下标 $ltes$ 表示低温储热换热器。

储水罐模型见式(14)~式(17)。

$$Q_{hwt} = m_{water}(h_{in} - h_{out})\Delta t_{es} \quad (14)$$

$$Q_{lwt} = m_{water}(h_{out} - h_{in})\Delta t_{er} \quad (15)$$

$$V_{hwt} = \frac{m_{water}\Delta t_{es}}{\rho_{hwt}} \quad (16)$$

$$V_{lwt} = \frac{m_{water}\Delta t_{er}}{\rho_{lwt}} \quad (17)$$

式中, Q_{hwt} 为连接过程高温储罐降温增差释放的热量, kWh ; Q_{lwt} 为连接过程低温储罐降温增差释放的热量, kWh ; V_{hwt} 为高温储水罐水体积, m^3 ; V_{lwt} 为低温储水罐水体积, m^3 ; ρ_{hwt} 为高温储水罐温度下水密度, kg/m^3 ; ρ_{lwt} 为低温储水罐温度下水密度, kg/m^3 ; 下标 hwt 表示高温储水罐; lwt 表示低温储水罐。

工质平衡方程见式(18)、式(19)。

$$\sum m_{in} = \sum m_{out} \quad (18)$$

$$\sum (mh)_{in} \Delta t - \sum (mh)_{out} \Delta t + \sum Q + \sum W = 0 \quad (19)$$

式中, $\sum Q$ 为系统与外界的总换热量; $\sum W$ 为系统与外界交换功。

电-电往返效率(简称往返效率, η_{RT}) 定义为储能系统在完成一次完整储能释能往返后, 输出电量与输入电量的比值, 即式(20)。

$$\eta_{RT} = \frac{W_e}{W_c} \quad (20)$$

储电密度(ESDI), 定义为释能期间发电量与总储能介质体积之比, 即式(21)。

$$ESD1 = \frac{W_e}{V_{htes} + V_{ltes} + V_{hwt} + V_{lwt}} \quad (21)$$

单次往返供热量(Q_{re}) 定义为单次往返后可利用的热量, 即式(22)。

$$Q_{re} = Q_{hwt} + Q_{lwt} + Q_{ltes, er} - Q_{ltes, es} \quad (22)$$

总储能密度(ESD2) 定义为释能期间发电量和供热量之和与总储能介质体积之比, 即式(23)。

$$ESD2 = \frac{W_e + Q_{re}}{V_{htes} + V_{ltes} + V_{hwt} + V_{lwt}} \quad (23)$$

电-热(蒸汽)联供综合效率(简称联供综合效率 η_{TE}) 定义为一次往返中, 输出热量和输出电量之和与输入电量之比, 即式(24)。

$$\eta_{TE} = \frac{Q_{re} + W_e}{W_c} \quad (24)$$

2.2 条件及参数设置

本工作运行所采用的参数如表 1 所示。

表 1 系统基本参数	
Table 1 Basic parameters of energy storage system	
参数	数值
低温端温度/℃	120
高温端温度/℃	250
压缩机等熵效率	0.85 ^[30]
膨胀机等熵效率	0.90 ^[30]
压缩机机械效率	1
膨胀机机械效率	1
压缩机入口气相分率	0.5
高温储热换热器储热效率	0.95
工质流量/(kg/h)	1000
释能过程时间/h	4
储能过程时间/h	4
储热换热器最小换热温差/K	2

储热材料可根据实际温度选取，在本工作中以硝酸锂和赤藓糖醇为例，其物性见表 2^[31]。

根据储热换热器最小换热温差，设计储水罐温度降低 4K。

表 2 储热材料物性			
Table 2 Properties of thermal storage materials			
储热换热器类别	储热材料	相变温度/℃	储热密度/(kWh/m ³)
高温储热换热器	硝酸锂	250	240
低温储热换热器	赤藓糖醇	120	130

表 3 能量平衡验证					
Table 3 Energy balance verification					
部件	(输入电功率/工质焓降)/kW	(工质焓增/输出电功率)/kW	输出热功率/kW	热损失/kW	不平衡率
压缩机	95.6735	95.6734	0.0000	0.0000	3.4116×10 ⁻¹⁰
膨胀机	68.5372	68.5372	0.0000	0.0000	7.0968×10 ⁻¹⁰
系统	95.6735	68.5372	15.3576	11.7787	3.1357×10 ⁻⁹

通过上述系统热力学模型，计算得到系统设计工况下各点热力学参数，如表 4 所示。

系统输入电功率为 95.67 kW、输出电功率为 68.54 kW，即一次往返，系统输入电量为 382.69 kWh、系统输出电量为 274.15 kWh，电-电往返效率为 71.64%。经过一次往返，储能释能连接过程中，储水罐降温增差过程分别获得 21.64 kWh 和 18.88 kWh 的热量；低温储热换热器供热 20.91 kWh 热量，计算得到单次往返供热量为 61.43 kWh，电-热(蒸汽)联供综合效率为 87.69%。储能过程中，高温储水罐中水的体积为 5.03 m³，高温储热换热器储存热量为 942.29 kWh，所需硝酸锂的体积为 3.93 m³；释能过程中，低温储水罐水的体积为

3 结果与讨论

在给定的设计工况下，选取 Refprop 物性包，依据 Nist Refprop 数据库中水的物性参数，本工作得到了开式卡诺电池储电储热联供系统的热力学性能，同时为评估开式系统的相对优势，在相同设计工况与理论假设下，将本系统效率与两相闭式卡诺电池进行对标分析。进一步地，开展了系统参数敏感性分析。一方面，重点探讨了压缩机入口气相分率与出口压力对系统热力学性能的影响；另一方面，量化压缩机与膨胀机等熵效率及储水罐降温增差大小对系统关键指标的影响程度。

3.1 系统设计工况性能

本工作系统设计参数见表 1。为确保热力学模型的可靠性与计算精度，本研究对关键部件以及整个系统进行了严格的能量平衡验证。能量平衡验证结果见表 3，压缩机输入电功率 95.6735 kW，工质焓增 95.6734 kW；膨胀机工质焓降 68.5372 kW，输出电功率 68.5372 kW；系统输入电功率 95.6735 kW，热损失 11.7787 kW，输出电功率 68.5372 kW，输出热功率 15.3576 kW。能量不平衡率在工程允许范围内，验证了系统模型具有良好的可靠性和计算精度。

4.25 m³，低温储热换热器储存热量为 1226.49 kWh，所需赤藓糖醇 9.44 m³，因此整个系统的储电密度为 12.10 kWh/m³，总储能密度为 14.81 kWh/m³。

典型的两相区闭式卡诺电池系统，具体 Aspen Plus 模型如图 4 所示，图 5 展示了其工质循环温熵图。在相同设计工况与理论假设下(泵效率为 0.85、节流过程为等焓节流)，系统输入电功率为 95.67 kW，释能过程净输出电功率为 33.48 kW，即一次往返，系统输入电量 382.69 kWh、系统输出电量 133.91 kWh，电-电往返效率为 34.99%。经过一次往返，储能释能连接过程中，低温储热换热器供热 201.67 kWh 热量，即单次往返供热量为 201.67 kWh，电-热(蒸汽)联供综合效率为 87.69%。储能过程中，高温

储热换热器储存热量为 942.29 kWh, 所需硝酸锂体积为 3.93 m³; 释能过程中, 低温储热换热器储存热量为 559.60 kWh, 所需赤藓糖醇 4.31 m³, 因此典型两相闭式系统的储电密度为 16.25 kWh/m³, 总储能密度为 40.73 kWh/m³。

两种系统的性能参数对比结果(表 5)表明, 二者联供综合效率数值相近, 其原因为两种系统能量

输入及热损失相近; 闭式系统的供热能力更强且储电密度更高, 而开式系统往返效率比闭式系统往返效率高 36.65%。其主要原因是闭式系统由热机循环和热泵循环组成, 无工质储罐, 储电密度更高; 但热力转换过程多、部件多、不可逆损失大, 导致工质做功能力下降, 往返效率低, 符合理论分析。

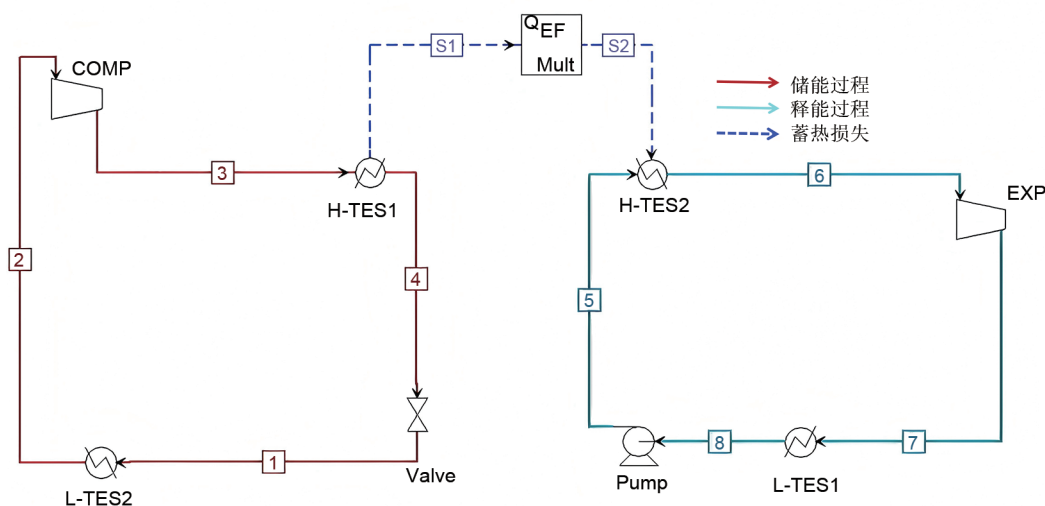


图 4 典型两相区闭式卡诺电池 Aspen Plus 流程

Fig. 4 Aspen Plus flowchart of typical two-phase closed-cycle Carnot battery

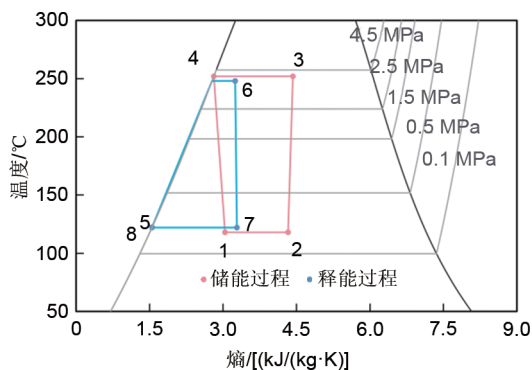


图 5 典型两相区闭式卡诺电池工质循环温熵图

Fig. 5 Temperature-entropy diagram of the working fluid in typical two-phase closed-cycle Carnot battery

针对储电密度和电-电往返效率, 将本系统与目前常见的压缩气体储能系统及闭式卡诺电池系统进行对比, 如图 6 所示^[12, 22, 26-28, 30, 32-45]。部分压缩气体储能系统储电密度较高, 是因为在计算储电密度时未考虑储热材料体积, 而卡诺电池总体而言储电密度较高, 但是电-电往返效率较低。本系统同时兼具高电-电往返效率和较高的储电密度, 系统热力学性能更好。

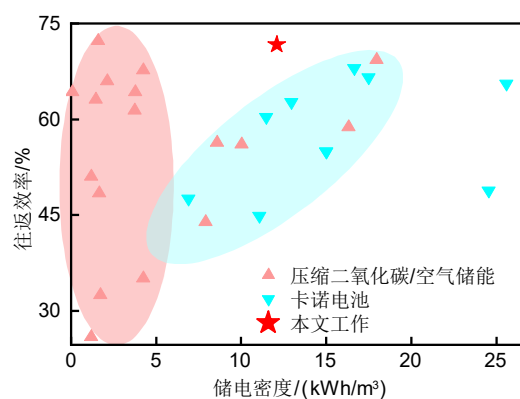


图 6 系统性能对比

Fig. 6 Performance comparison of different energy storage systems

3.2 系统参数敏感性分析

系统运行参数的变化及核心设备的设计参数或性能参数的变化会直接影响系统性能, 为探究关键参数对系统热力学性能的影响规律, 本节选取了压缩机入口气相分率、压缩机出口压力、压力机械等熵效率以及储水罐降温范围 4 个核心参数展开敏感

表 4 开式卡诺电池系统各点热力学参数				
Table 4 Thermodynamic parameters at each point of open-cycle Carnot battery system				
设计点	温度/℃	压力/MPa	气相分率	体积流量/(m³/h)
1	118	0.1864	0	1.06
2	118	0.1864	0.500	473.52
3	252	4.1122	0.497	24.70
4	252	4.1122	0.000	1.26
5	248	3.8436	0.000	1.25
6	248	3.8436	0.467	24.88
7	122	0.2116	0.511	429.95
8	122	0.2116	0.000	1.06

表 5 系统性能参数对比		
Table 5 Comparison of system performance parameters		
性能参数	开式卡诺电池系统	典型闭式卡诺电池系统
输入电量 W_i /kWh	382.69	382.69
输出电量 W_o /kWh	274.15	133.91
高温降温温差释热量 Q_{hwt} /kWh	21.64	0
低温降温温差释热量 Q_{lwt} /kWh	18.88	0
高温储热换热器储热量 $Q_{htes,es}$ /kWh	942.29	942.29
高温储热换热器释热量 $Q_{htes,er}$ /kWh	942.29	942.29
低温储热换热器释热量 $Q_{ltes,er}$ /kWh	1247.40	761.27
低温储热换热器储热量 $Q_{ltes,es}$ /kWh	1226.49	559.60
单次往返供热量 Q_{re} /kWh	61.43	201.67
低温储热材料体积 V_{ltse}/m^3	9.44	4.31
高温储热材料体积 V_{htse}/m^3	3.93	3.93
低温储水罐体积 V_{lwt}/m^3	4.25	0
高温储水罐体积 V_{hwt}/m^3	5.03	0
电-电往返效率 $\eta_{RT}/\%$	71.64	34.99
电-热(蒸汽)联供综合效率 $\eta_{TE}/\%$	87.69	87.69
储电密度 ESD1/(kWh/m³)	12.10	16.25
总储能密度(电+蒸汽)ESD2/(kWh/m³)	14.81	40.73

性分析，分别研究了压缩机气相分率与出口压力对系统热力学性能的影响，以及压缩机等熵效率、膨胀机等熵效率与储水罐降温范围对系统关键指标的影响。

压缩机入口气相分率对系统热力学性能的影响见图 7，结果表明当压缩机入口气相分率升高时，输入电量和输出电量上升，单次往返供热量上升，储热量急剧上升。在压缩机中起主要作用的为气态工质，所以压缩机入口气相分率升高会导致输入电量和输出电量上升。较高的入口气相分率还会导致工质气液相变时放出更多的热量，引起储热量急剧上升、供热量上升。而随着入口气相分率升高，往返效率无明显变化，联供综合效率下降。其主要原因是系统温区没有变化，所以往返效率不变；而系

统储热量上升，导致耗热量上升，引起联供综合效率下降。根据气相分率对系统性能的影响可知，当热需求较大时，可在增加工质流量的同时合理升高气相分率，使单次往返供热量上升。

压缩机出口压力对系统热力学性能的影响见图 8，结果表明当出口压力升高时，工质工作温区拓宽，输入输出电量、往返效率和联供综合效率都有提升，且近似与出口压力成对数相关。低温储热量基本保持不变，由于出口压力上升会引起高温温度上升，相变潜热减小，所以高温储热需求量下降。此外，随着压力不断升高，电-电往返效率接近 75%、电-热(蒸汽)联供综合效率接近 95%，但压力升高也会提高系统对压缩机、膨胀机等设备的要求，增加设备成本，具体运行压力应根据实际需

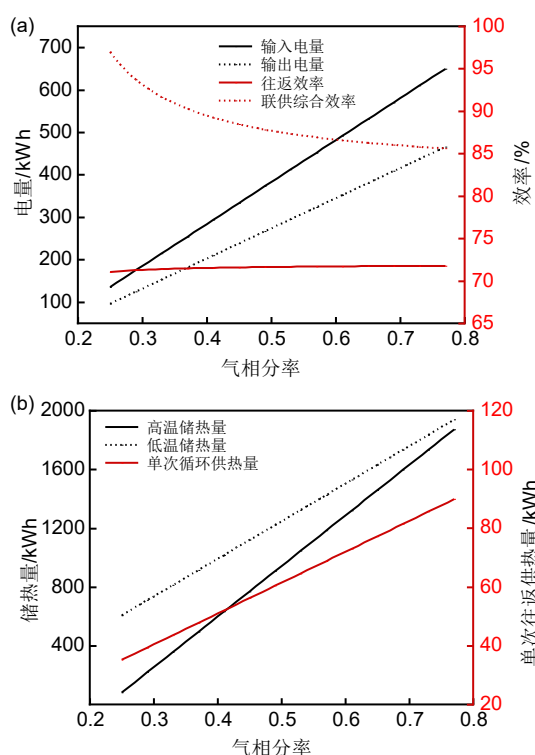


图7 压缩机入口气相分率对系统热力学性能的影响 (a) 电量及效率; (b) 储热量及供热量

Fig. 7 Effect of compressor inlet gas-phase fraction on system thermal performance (a) electricity and efficiency, (b) heat storage and heat supply

求与性能分析综合考虑。

在设计工况下, 压缩机等熵效率从0.5增加至0.85与膨胀机等熵效率从0.5增加至0.9时系统往返效率及储电密度的变化趋势见图9。根据结果可得, 压力机械等熵效率越高, 系统往返效率越高, 在压缩机等熵效率为0.8、膨胀机等熵效率为0.8时, 系统往返效率在60%以上; 压缩机等熵效率越低、膨胀机等熵效率越高, 则储电密度越高, 储电密度最高可达13.87 kWh/m³。其原因在于压缩机等熵效率越低、压缩机出口气相分率越高, 从而会引起膨胀机入口气相分率增加, 尽管会导致储热体积增加, 但做功能力提升比例大于系统体积提升比例; 膨胀机等熵效率越高, 相同状态下工质做功能力越强。综上所述, 往返效率与压力机械等熵效率成正比; 储电密度与压缩机等熵效率成反比, 与膨胀机等熵效率成正比。

在设计工况下, 高温储水罐与低温储水罐的降温从4K增加至20K时, 系统往返效率及储电密度

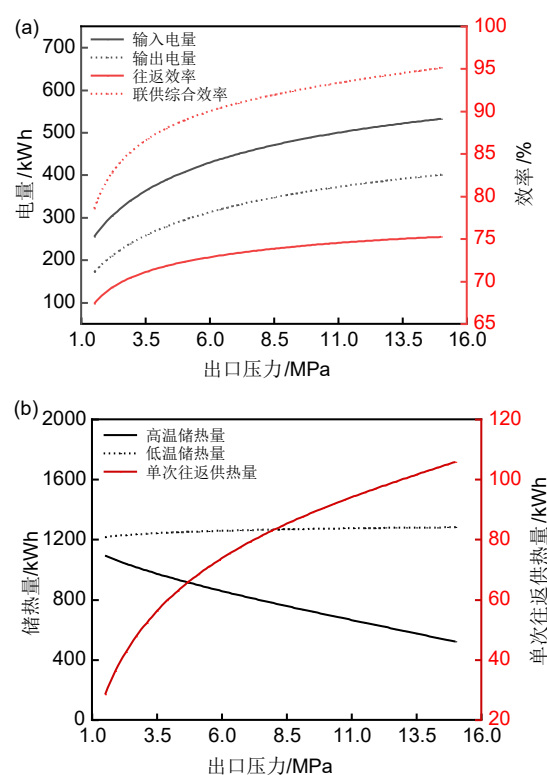


图8 压缩机出口压力对系统热力学性能的影响 (a) 电量及效率; (b) 储热量及供热量

Fig. 8 Effect of compressor outlet pressure on system thermal performance (a) electricity and efficiency, (b) heat storage and heat supply

的变化趋势见图10。结果表明, 往返效率、储电密度均与储水罐降温大小成反比, 其主要原因为储水罐降温增大时, 系统供热量上升、工质做功能力下降、输出功率下降, 而压缩机进出口温差上升、输入电功率上升, 因此系统往返效率与储电密度均下降。但当储水罐降温较大时, 储热换热器内换热温差增大, 有利于换热器换热, 因此在实际设计中应结合换热器类型与换热温差大小合理选择储罐降温范围。

上述参数对系统性能影响各有侧重点, 压缩机入口气相分率与出口压力可通过运行调控实现系统性能的动态匹配, 分别在提升供热量与效率方面发挥关键作用; 压力机械的等熵效率决定系统性能的理论上限, 是设备选型与制造的核心考量因素; 储水罐降温范围则需要兼顾系统效率与换热器性能, 对后续换热器选型与设计具有指导意义。通过对各参数的敏感性分析, 可为卡诺电池系统的运行调控与设计优化提供全面的理论支撑。

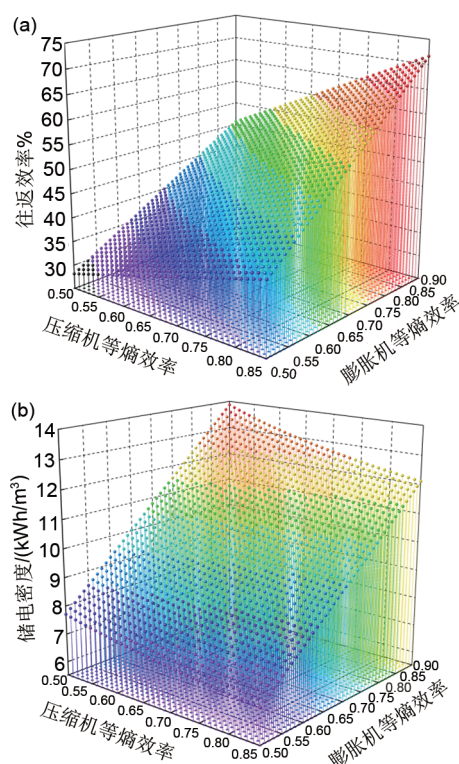


图9 压力机械等熵效率对系统指标的影响 (a) 往返效率；(b) 储电密度

Fig. 9 Effect of pressure machine isentropic efficiency on system Indicators (a) round-trip efficiency, (b) energy storage density

4 结 论

本工作提出的基于开式朗肯热力过程的卡诺电池技术是一种储能密度高、系统结构简单、电-电往返效率高的新型储能技术。本工作设计并模拟了开式卡诺电池储电储热联供系统，分析了其热力学性能，结论如下。

(1) 在高温端设计温度 250°C 、低温端设计温度 120°C 、压缩机等熵效率 0.85、膨胀机等熵效率 0.9 的情况下，该系统采用水作为工质，硝酸锂、赤藓糖醇分别作为高低温储热材料时，其电-电往返效率达到 71.64%，远高于相同条件下的典型两相区闭式卡诺电池系统；电-热(蒸汽)联供综合效率可达 87.69%；储电密度可达 12.10 kWh/m^3 。

(2) 提高压缩机出口压力会使系统电-电往返效率和电-热(蒸汽)联供综合效率提高、单次往返供热量增加、低温储热量基本保持不变；提高压缩机入口气相分率对系统电-电往返效率无明显影响、单次往返供热量增加，但电-热(蒸汽)联供综合效率

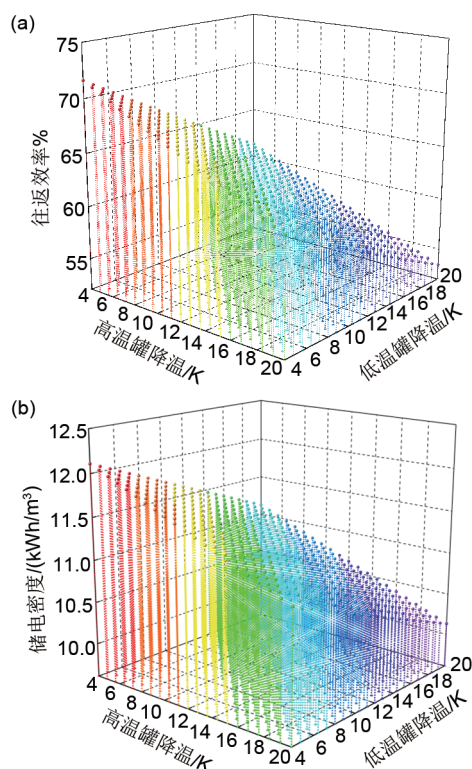


图10 储水罐降温对系统指标的影响 (a) 往返效率；(b) 储电密度

Fig. 10 Effect of tank cooling on system Indicators (a) round-trip efficiency, (b) energy storage density

下降、储热量急剧上升。

(3) 系统往返效率与压缩机、膨胀机等熵效率成正比，储电密度与压缩机等熵效率成反比、与膨胀机等熵效率成正比。在压缩机等熵效率 0.8、膨胀机等熵效率 0.8 时，系统往返效率在 60% 以上；在压缩机等熵效率 0.5、膨胀机等熵效率 0.9 时，储电密度最高可达 13.87 kWh/m^3 。

总体而言，开式卡诺电池储电储热联供系统具有电-电往返效率高、结构简单、储能密度高且不受地理因素限制的优点。因此，开式卡诺电池作为一种新型储能技术在储能领域、热电联供领域具有广阔前景，但目前储热换热器形式以及两相区压力机械的工作曲线仍需进一步深入探索，并开展验证性实验研究工作。

参 考 文 献

- [1] YANG Y K, WANG M Y, LIU Y, et al. Peak-off-peak load shifting: Are public willing to accept the peak and off-peak time of use electricity price? [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 199:

- 1066-1071. DOI:10.1016/j.jclepro.2018.06.181.
- [2] 谢小荣, 马宁嘉, 刘威, 等. 新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 158-169. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.220025.
- XIE X R, MA N J, LIU W, et al. Functions of energy storage in renewable energy dominated power systems: Review and prospect[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 158-169. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.220025.
- [3] 郭丁彰, 尹钊, 周学志, 等. 压缩空气储能系统储气装置研究现状与发展趋势[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(5): 1486-1493. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0356.
- GUO D Z, YIN Z, ZHOU X Z, et al. Status and prospect of gas storage device in compressed air energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1486-1493. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0356.
- [4] 孙健, 陶建龙, 胡芸蓉, 等. 基于热泵型储电技术国内外研究综述[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(6): 1963-1976. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0938.
- SUN J, TAO J L, HU Y R, et al. Summary of research on power storage technology based on heat pump at home and abroad[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(6): 1963-1976. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0938.
- [5] 陈海生, 李泓, 徐玉杰, 等. 2024年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(6): 2149-2192. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0553.
- CHEN H S, LI H, XU Y J, et al. Research progress on China's energy storage technology in 2024[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(6): 2149-2192. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0553.
- [6] 万明忠, 王元媛, 李峻, 等. 压缩空气储能技术研究进展及未来展望[J]. 综合智慧能源, 2023, 45(9): 26-31. DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2023.09.004.
- WAN M Z, WANG Y Y, LI J, et al. Research progress and prospect of compressed air energy storage technology[J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(9): 26-31. DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2023.09.004.
- [7] 关苏敏, 钟声远, 李翰宸, 等. 压缩CO₂储能技术研究现状及发展趋势[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(1): 240-254. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0710.
- GUAN S M, ZHONG S Y, LI H C, et al. Research status and development trend of compressed CO₂ energy storage technology[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(1): 240-254. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0710.
- [8] LI F H, XING L L, SU W, et al. An idea to construct integrated energy systems of data center by combining CO₂ heat pump and compressed CO₂ energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 75: 109581. DOI:10.1016/j.est.2023.109581.
- [9] LI Y, YU H, XIAO Y L, et al. Numerical verification on the feasibility of compressed carbon dioxide energy storage in two aquifers[J]. Renewable Energy, 2023, 207: 743-764. DOI:10.1016/j.renene.2023.03.013.
- [10] LI H C, SU W, DAI H T, et al. Thermo-economic analysis on the gas-liquid compressed carbon dioxide energy storage under different sliding pressure ranges of low-pressure gas storage[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 134: 118167. DOI:10.1016/j.est.2025.118167.
- [11] XU W P, ZHAO P, WANG J F, et al. Comprehensive thermo-economic analysis of an isobaric compressed CO₂ energy storage system: Improvement of the thermodynamic pathway[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 322: 119088. DOI:10.1016/j.enconman.2024.119088.
- [12] HAO Y P, HE Q, LIU W Y, et al. Thermodynamic analysis of a novel fossil-fuel-free energy storage system with a trans-critical carbon dioxide cycle and heat pump[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(10): 7924-7937. DOI:10.1002/er.5130.
- [13] ZHANG X R, WANG G B. Thermodynamic analysis of a novel energy storage system based on compressed CO₂ fluid[J]. International Journal of Energy Research, 2017, 41(10): 1487-1503. DOI:10.1002/er.3732.
- [14] 高远志, 殷戈, 孙雪丽, 等. 液态空气储能技术研究现状与展望[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(10): 3900-3916. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0307.
- GAO Y Z, YIN G, SUN X L, et al. Research status and outlooks of liquid air energy storage technology[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(10): 3900-3916. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0307.
- [15] WAN Y K, WU C, LIU Y, et al. A technical feasibility study of a liquid carbon dioxide energy storage system: Integrated component design and off-design performance analysis[J]. Applied Energy, 2023, 350: 121797. DOI:10.1016/j.apenergy.2023.121797.
- [16] ZHENG P Y, ZHANG Z T, YANG J L, et al. Thermodynamic and economic analysis of compressed carbon dioxide energy storage systems based on different storage modes[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 243: 122669. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2024.122669.
- [17] ZHAO P, XU W P, ZHANG S Q, et al. Components design and performance analysis of a novel compressed carbon dioxide energy storage system: A pathway towards realizability[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 229: 113679. DOI:10.1016/j.enconman.2020.113679.
- [18] FRATE G F, PATERNOSTRO L, FERRARI L, et al. Off-design of a pumped thermal energy storage based on closed brayton cycles[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2022, 144(2): 021016. DOI:10.1115/1.4052426.
- [19] ZHANG H, WANG L, LIN X P, et al. Technical and economic analysis of Brayton-cycle-based pumped thermal electricity storage systems with direct and indirect thermal energy storage[J]. Energy, 2022, 239: 121966. DOI:10.1016/j.energy.2021.121966.
- [20] VECCHI A, KNOBLOCH K, LIANG T, et al. Carnot Battery development: A review on system performance, applications and commercial state-of-the-art[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 55: 105782. DOI:10.1016/j.est.2022.105782.
- [21] HUANG J X, ZHAO Y, SONG J, et al. Thermodynamic investigation of a Joule-Brayton cycle Carnot battery multi-energy system integrated with external thermal (heat and cold) sources[J]. Applied Energy, 2025, 377: 124652. DOI:10.1016/j.apenergy.2024.124652.
- [22] 王文瑞, 郝佳豪, 郑平洋, 等. 基于高温显热蓄热的二氧化碳卡诺电池系统设计与热经济性分析[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(7): 2714-2728. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0084.
- WANG W R, HAO J H, ZHENG P Y, et al. Design and

- thermoeconomic assessments of CO₂ Carnot battery employing sensible heat storage at high temperatures[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(7): 2714-2728. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0084.
- [23] DUMONT O, FRATE G F, PILLAI A, et al. Carnot battery technology: A state-of-the-art review[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 32: 101756. DOI:10.1016/j.est.2020.101756.
- [24] SUN Y, ZHANG X, XU C, et al. Storing electricity in the low-rank coal: The heat-upgrading Carnot battery concept and a comprehensive thermodynamic analysis[J]. *Energy*, 2024, 312: 133567. DOI:10.1016/j.energy.2024.133567.
- [25] FERGANI Z, MOROSUK T. Multi-objective exergy-based optimization of a Carnot battery under different charging/discharging durations[J]. *Energy*, 2025, 338: 138964. DOI:10.1016/j.energy.2025.138964.
- [26] FU H L, HE Q, SONG J T, et al. Thermodynamic of a novel solar heat storage compressed carbon dioxide energy storage system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 247: 114757. DOI:10.1016/j.enconman.2021.114757.
- [27] LU M Q, DU Y D, YANG C, et al. Performance analysis and multi-objective optimization of a combined system of Brayton cycle and compression energy storage based on supercritical carbon dioxide[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 236: 121837. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2023.121837.
- [28] HE T Y, CAO Y, SI F Q, et al. Off-design characteristics and operation strategy analysis of a compressed carbon dioxide energy storage system coupled with a combined heating and power plant[J]. *Energy*, 2024, 303: 131983. DOI: 10.1016/j.energy.2024.131983.
- [29] 罗开琦, 黄云, 罗二仓, 等. 一种基于开式卡诺电池循环的储电系统: CN120546298A[P]. 2025-08-26.
- [30] CHAE Y J, LEE J I. Thermodynamic analysis of compressed and liquid carbon dioxide energy storage system integrated with steam cycle for flexible operation of thermal power plant[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 256: 115374. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115374.
- [31] JANKOWSKI N R, MCCLUSKEY F P. A review of phase change materials for vehicle component thermal buffering[J]. *Applied Energy*, 2014, 113: 1525-1561. DOI: 10.1016/j.apenergy. 2013. 08.026.
- [32] ZHANG Y, WU Y T, YANG K. Dynamic characteristics of a two-stage compression and two-stage expansion Compressed Carbon dioxide energy storage system under sliding pressure operation[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 254: 115218. DOI:10.1016/j.enconman.2022.115218.
- [33] TAFONE A, PILI R, PIHL ANDERSEN M, et al. Dynamic modelling of a compressed heat energy storage (CHEST) system integrated with a cascaded phase change materials thermal energy storage[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 226: 120256. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2023.120256.
- [34] YANG H, CUI J Y, LIU L S, et al. Dynamic simulation of medium-temperature thermal storage compressed air energy storage (TS-CAES) system using Aspen Hysys[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 123: 116757. DOI:10.1016/j.est.2025.116757.
- [35] YANG D L, TANG G H, LUO K H, et al. Integration and conversion of supercritical carbon dioxide coal-fired power cycle and high-efficiency energy storage cycle: Feasibility analysisbasedona three-step strategy[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 269: 116074. DOI: 10.1016/j.enconman. 2022.116074.
- [36] FRATE G F, FERRARI L, DESIDERI U. Multi-criteria investigation of a pumped thermal electricity storage (PTES) system with thermal integration and sensible heat storage[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 208: 112530. DOI:10.1016/j.enconman.2020.112530.
- [37] WEI L J, LIU X, WU F, et al. Performance analysis of a novel isobaric compressed air energy storage (CAES) system based on dual fluid[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 108: 115001. DOI:10.1016/j.est.2024.115001.
- [38] GAO C. Performance investigation of solar-assisted supercritical compressed carbon dioxide energy storage systems[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 79: 110179. DOI: 10.1016/j.est. 2023. 110179.
- [39] XU M J, WANG X, WANG Z H, et al. Preliminary design and performance assessment of compressed supercritical carbon dioxide energy storage system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 183: 116153. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2020.116153.
- [40] HE T Y, CAO Y, SI F Q. Thermodynamic analysis and optimization of a compressed carbon dioxide energy storage system coupled with a combined heating and power unit[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 277: 116618. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.116618.
- [41] WU C, WAN Y K, LIU Y, et al. Thermodynamic simulation and economic analysis of a novel liquid carbon dioxide energy storage system[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55: 105544. DOI:10.1016/j.est.2022.105544.
- [42] 路唱. 大规模热泵储能系统热力学分析与动态特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- LU C. Study on thermodynamic and dynamic characteristics of large-scale pumped thermal energy storage system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [43] 杨鹤. 基于布雷顿循环的卡诺电池储能特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2024.
- YANG H. Research on energy storage characteristics of Carnot battery with brayton cycle[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2024.
- [44] 黄正杰, 罗向龙, 梁颖宗, 等. 基于填充床相变蓄热器的卡诺电池系统特性研究[J]. *工程热物理学报*, 2025, 46(4): 1034-1040.
- HUANG Z J, LUO X L, LIANG Y Z, et al. Study on the characteristics of a Carnot battery based on a packed bed latent heat storage[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2025, 46 (4): 1034-1040.
- [45] 陈力, 廖传华, 王常青. 液-液二氧化碳储能系统的性能分析[J]. *化工机械*, 2024, 51(1): 151-159, 164. DOI: 10.20031/j.cnki.0254-6094.202401020.
- CHEN L, LIAO C H, WANG C Q. Performance analysis of liquid-liquid carbon dioxide energy storage system[J]. *Chemical Engineering & Machinery*, 2024, 51(1): 151-159, 164. DOI: 10.20031/j.cnki.0254-6094.202401020.